

## ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 669.154.002.61

© Скребцов А.М.<sup>1</sup>, Кузьмин Ю.Д.<sup>2</sup>, Секачев А.О.<sup>3</sup>,  
Качиков А.С.<sup>4</sup>, Терзи В.В.<sup>5</sup>

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛИКВИДУС ВЫПЛАВЛЯЕМЫХ СТАЛЕЙ И ПЕРЕГРЕВА НАД НИМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

При выплавке стали, в производстве и в теории процесса, не всегда учитывается температура ликвидус выплавляемой стали. Найдено, по литературным данным, что перегрев стали над ликвидусом и ее механические свойства зависят от ее температуры ликвидус. Предложен способ уточнения оптимальной температуры выпуска металла из печи.

**Ключевые слова:** Температура выпуска металла из печи, перегрев стали над ликвидусом, механические свойства стали.

*Скребцов О.М., Кузьмин Ю.Д., Секачев О.О., Качиков О.С., Терзи В.В. Вплив температури ліквідус виплавлюваних сталей і перегріву над ним на механічні властивості металу. При виплавці сталі, у виробництві і в теорії процесу, не завжди враховується температура ліквідус виплавленої сталі. Знайдено, за літературними даними, що перегрів сталі над ліквідус і її механічні властивості залежать від її температури ліквідус. Запропоновано спосіб уточнення оптимальної температури випуску металу з печі.*

**Ключові слова:** температура випуску металу з печі, перегрів сталі над ліквідусу, механічні властивості сталі.

*O.M. Skrebtsov, J.D. Kuzmin, O.O. Sekachev, O.S. Kachikov, V.V. Terzi. The influence of the liquidus temperature of melted steel and heat above it on mechanical properties of metal. At steel manufacturing and in the theory of the process liquidus temperature of steel is not always taken into account. It was found that according to the literature that the overheating of the steel liquidus and its mechanical properties depend on the temperature of the liquidus. We propose a way of refining the optimal temperature metal tapping from the furnace.*

**Keywords:** temperature metal tapping from the furnace, hot steel on the liquidus, the mechanical properties of steel.

**Постановка проблемы.** Известно, что при выплавке металла для каждой марки стали есть свои оптимальные температуры его нагрева перед выпуском из плавильного агрегата [1]. Однако при этом, как правило, не учитывается температура ликвидус металла, а следовательно, его перегрев над ним. Как показали дальнейшие исследования точка ликвидус металла влияет на качество готовой металлопродукции, например, на количество неметаллических включений [2].

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] для сплавов на основе алюминия найдено, что в интервале температур ликвидус – кипения металла имеются два – три структурных превращения жидкости, которым в затвердевшем металле соответствуют максимумы их механических свойств. Экспериментально это подтверждено также в работе [3]. Для

<sup>1</sup> д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>4</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>5</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

сплавов на основе железа в их расплавах, путем обобщения опубликованных исследований, отмечены две температуры (вблизи ликвидуса и вблизи температуры кипения) при которых возникают структурные превращения и возможно повышение механических свойств металла [1]. Однако, влияние изменения температуры ликвидус стали на изменение механических свойств готовых изделий из металла не обсуждалось и не рассматривалось в работе [1], как и в публикациях [2, 3].

**Цель статьи** - получить новые данные по влиянию температуры ликвидус стали на механические свойства затвердевшего металла; определить оптимальный перегрев расплава перед выпуском его из печи с целью достижения максимума механических свойств металлоизделий.

**Изложение основного материала.** В качестве исходных данных для достижения поставленного в статье результата использовали литературные данные по температурам выпуска стали из печи для разных марок сталей [4-7]. Кроме того использовали данные по механическим свойствам стали из ГОСТов (977 – 88, 4543 – 71, 1577 – 93, 8731 – 87). Так, например, по данным публикации [4] температуры ликвидус сталей 20ГСЛ, 70ХЛ, ЛА-1 и 110Г13Л составляют соответственно 1520, 1470, 1410 и 1370 °С. Поэтому, очевидно, что в любом плавильном агрегате при выплавке этих сталей может возникнуть не одинаковый их перегрев над линией ликвидуса. Это видно из рис.1, на котором представлено схема различных показателей температур при плавке металла разных марок в ванне печи. При обобщении опытных данных производственных плавов стали в работе [1] автор на примере рисунка 2 показал, что разным маркам стали соответствуют разные перегревы температур выпуска ( $t_b$ ) над ликвидусом ( $t_l$ ), т.е.  $t_b / t_l$ .

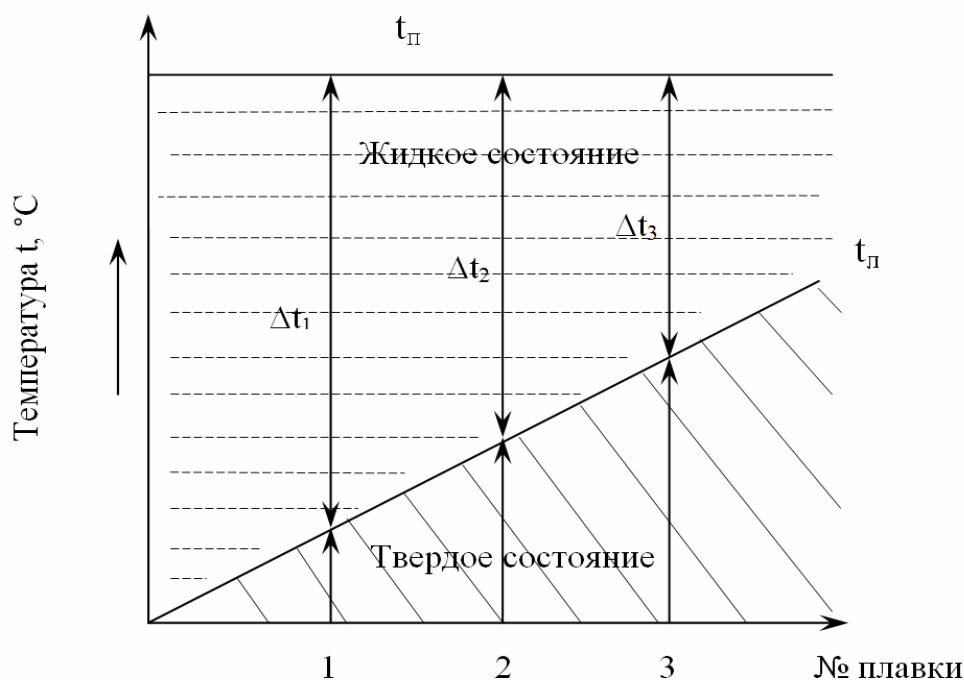


Рис. 1 – Схема различных величин при плавке металла в ванне печи:  $t_p$  – температура в печи, обусловленной ее тепловой мощностью;  $t_{л1}$ ,  $t_{л2}$ ,  $t_{л3}$  – температуры ликвидус отдельных марок сталей;  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  – фактический перегрев расплава над линией ликвидус

Температура ликвидус разных марок стали (в °С) вычислили с помощью известной в литературе формулы по их химическому составу (см. напр. [8]):

$$t_l = 1539 - (70 \cdot C\% - 8 \cdot Si\% - 5 \cdot Mn\% - 25 \cdot S\% - 30 \cdot P\% - 3 \cdot Ni\% - 1,5 \cdot Cr\% - 3 \cdot Mo\% - 1 \cdot W\% - 2 \cdot V\%), (1)$$

где 1539 – температура плавления чистого железа °С; C, Si, Mn, S, P, Ni, Cr, W, Mo, V – состав стали, приведенный в массовых процентах.

По литературным данным для различных печей провели изучение влияния температуры ликвидус металла, которая изменялась в пределах от 1480 до 1520 °С, на: а) температура выпуска металла из печи  $t_b$  и б) на разность температур выпуска металла из печи  $t_b$  и в ковше  $t_k$ . Разность  $t_b - t_k$  с увеличением температуры ликвидус уменьшалось линейно от 145 до 105 °С т.е. 40°С. Оказалось, что для всех печей температура выпуска металла практически постоянна (1620 - 1630°С) и не зависит от температуры ликвидус стали.

В соответствии с ГОСТом определили механические свойства сталей в зависимости от их температуры ликвидус  $t_l$  (пределы изменения 1480 -1520 °С). Результаты всех вычислений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства сталей в зависимости от их температуры ликвидус

№	Характеристики	Уравнение	Коэффициент корреляции, r	Достоверность аппроксимации, $R^2$	Свойство при $t_l$ min	Характеристики при $t_l$ max
1	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа.	$\sigma_{0,2} = -2,583t_l + 4199$	-0,69	0,48	362	272
2	Предел прочности $\sigma_b$ МПа.	$\sigma_b = -2,583t_l + 4199$	-0,78	0,61	645	460
3	Удлинение $\delta$ , %	$\delta = 0,434t_l - 637,3$	0,89	0,79	6	23
4	Сужение $\psi$ , %	$\psi = 0,427t_l - 615,1$	0,7	0,49	18	35
5	Ударная вязкость KCU кДж/см <sup>2</sup>	$KCU = 0,882t_l - 1290$	0,85	0,72	20	50

Как видно из таблицы 1, два свойства  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$  уменьшаются с повышением температуры ликвидус стали, а три свойства ( $\delta$ ,  $\psi$ , KCU), наоборот, увеличивается.

Таким образом, отсутствие учета величины температуры ликвидус выплавляемой стали может привести к нерациональному расходу тепловой энергии в печи во время плавки металла, а также к не стабильности механических свойств затвердевшего металла (уменьшение или увеличение по сравнению со средним значениями).

Для дальнейшего анализа полученных результатов ввели понятие относительной температуры  $t_i/t_l$  °С, где  $t_i$  – температура в печи в определенный момент плавки.

На рис. 2 представленная относительная температура расплава в печи  $t_i/t_l$  в зависимости от температур ликвидус  $t_l$  для следующих величин, - безразмерных температур перегрева металла в конце окислительного периода (линия 1), при выпуске металла из печи (линия 2) и в ковше (линия 3). Как видно из рисунка, с повышением температуры ликвидус металл  $t_l$  все три относительные температуры монотонно уменьшаются.

В таблице 2 приведены механические свойства сталей в зависимости от их температуры перегрева  $t_b/t_l$  над точкой ликвидуса при выпуске его из печи.

Из таблицы 2 видно что, с увеличением перегрева расплава одни свойства,  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$ , увеличивается с повышением температуры ликвидус стали, а три свойства,  $\delta$ ,  $\psi$ , KCU, непрерывно, уменьшаются.

Очевидно, для того чтобы оптимизировать механические свойства металла ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ , KCU) по температурам выпуска его из печи необходимо использовать их среднее значение, которое оказалось следующим:

$$t_b/t_l \text{ °С} = Q = 1,0825 (\pm 0,0072), \quad (2)$$

где величина 0,0072 – рекомендуемый (допустимый) интервал колебаний величины Q.

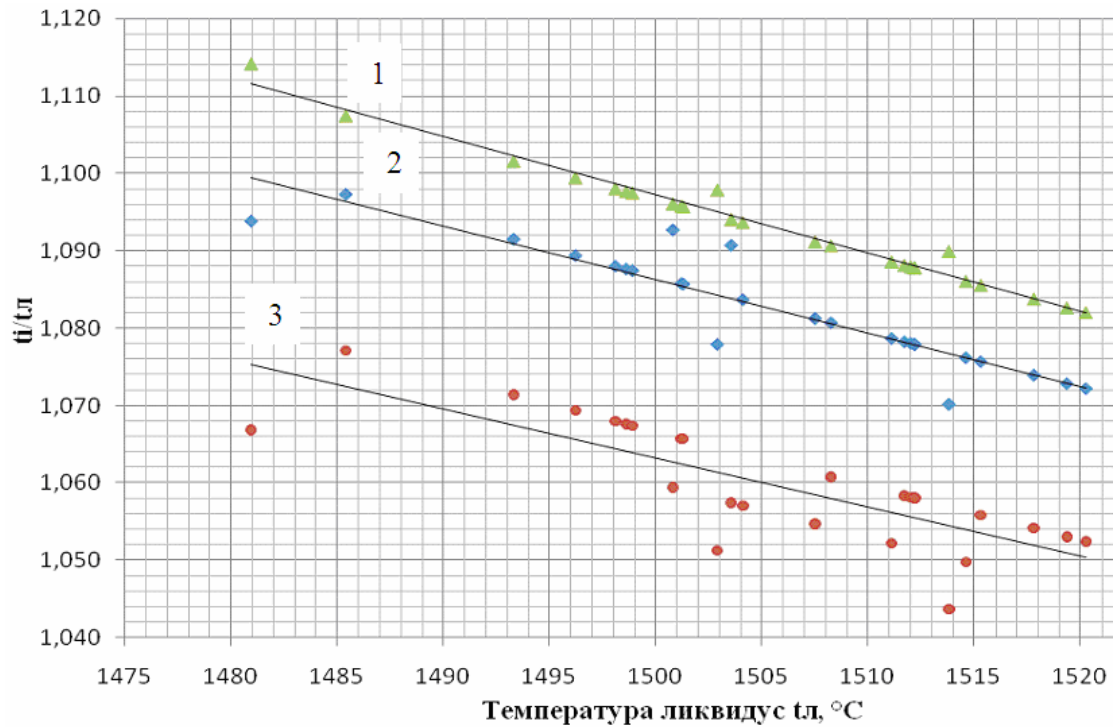


Рис. 2 – Относительная температуры расплава  $t_i/t_l$  в зависимости от температуры ликвидус  $t_l$  для следующих величин безразмерных температур перегрева металла: 1 - в конце окислительного периода; 2 - при выпуске металла из печи; 3 - в ковше

Таблица 2

Механические свойства сталей в зависимости от их температур перегрева над точкой ликвидус  $t_b/t_l$  при выпуске его из печи

№	Характеристики	Уравнение	Коэффициент корреляции, r	Достоверность аппроксимации, $R^2$	Характеристики при $t_b/t_l$ min	Характеристики при $t_b/t_l$ max
1	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ МПа.	$\sigma_{0,2}=2817 t_b/t_l-2761$	0,67	0,45	272	360
2	Предел прочности $\sigma_b$ МПа.	$\sigma_b=5880 t_b/t_l-5894$	0,76	0,58	450	620
3	Удлинение $\delta$ , %	$\delta = -619,4 t_b/t_l + 694,5$	-0,86	0,74	23,5	8,0
4	Сужение $\psi$ , %	$\psi = -479 t_b/t_l + 551,6$	-0,675	0,46	36	20
5	Ударная вязкость КСУ кДж/см <sup>2</sup>	$KCU = -1516 t_b/t_l + 1789$	-0,85	0,72	50,5	21,0

Из выражения (2) температура выпуска металла из печи должна соответствовать следующей формуле:

$$t_b = t_l \cdot 1,0825(\pm 0,0072). \quad (3)$$

На рис. 3 приведен график рекомендаций температуры выпуска металла из печи в зависимости от его температуры ликвидус. Как видно из рисунка, - чем больше температура ликвидус металла, тем больше должна быть температура выпуска металла из печи.

Используя результаты, представленные на рис. 3, создано изобретение: “Способ определения температуры выпуска стали из плавильного агрегата”.

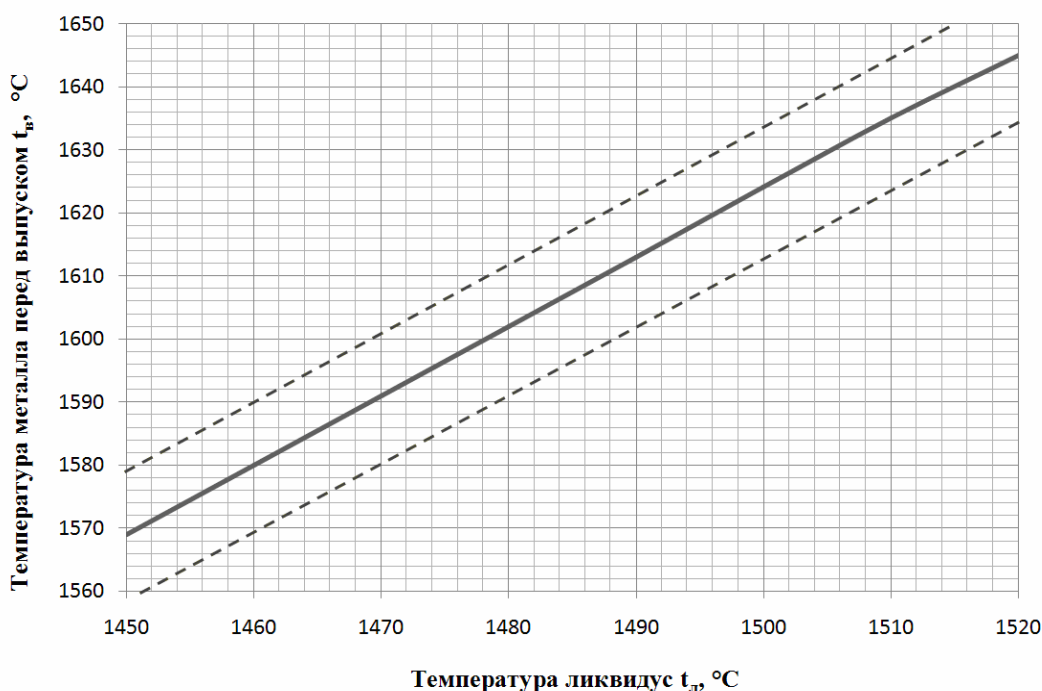


Рис. 3 – Рекомендовані оптимальні температури жидкой стали перед випуском її з печі в залежності від температури ликвидус,  $^\circ\text{C}$  виплавленої сталі

#### Выводы

1. В производственных условиях выплавки стали в различных агрегатах и в научных руководствах по этому процессу, как правило, при определении температуры выпуска металла из печи не всегда корректно учитываются его температура ликвидус.
2. Найдено, по литературным данным, что перегрев стали над температурой ее ликвидуса в печи в конце окислительного периода, при выпуске металла и в ковше линейно уменьшается с повышением температуры ликвидус.
3. Механические свойства стали, - предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и сужение, а также ударная вязкость, - существенно зависят от температуры ликвидус стали (пределы колебания  $\pm 10-100\%$ ).
4. Предложен способ и математическая формула для определения температуры выпуска металла из печи с целью получения оптимальных и стабильных свойств готовой металлопродукции.

#### Список использованных источников:

1. Скребцов А.М. Оптимальные температуры нагрева жидкого металла в плавильных агрегатах. Две температуры сплавов на основе железа / А.М. Скребцов // Процессы литья. – 2011. – №1. – С. 3-9.
2. Температура ликвидус металлического расплава и её влияние на количество оксидных неметаллических включений / А.М. Скребцов и др. // Актуальные проблемы современной металлургии. Сборник научных трудов посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.Я. Меджибожского. – Мариуполь: ПГТУ. – 2012. – С. 79-83.
3. Влияние температуры и времени выдержки расплава при ней на качество затвердевшей отливки / А.М. Скребцов // Вісник ПДТУ. – Вип. 22. – 2011. – С. 140-144.
4. Василевский П.Ф. Технология стального литья / П.Ф. Василевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 408 с.
5. Колосов М.И. Качество слитка спокойной стали / М.И. Колосов и др. – М.: Металлургия, 1973. – 408 с.
6. Карнаухов М.М. Металлургия стали / М.М. Карнаухов. Бессемеровский и томасовский процессы, – Л. - М.: ОНТИ НКТП, 1934. – 246 с.
7. Лейкин В.Е. Электрметаллургия стали и ферросплавов / В.Е. Лейкин, П.А. Сахарук. – М:

Металлургиздат, 1960. – 600 с.

8. Еланский Г.Н. Разливка и кристаллизация стали / Г.Н. Еланский. – М.: МГВИ, 2010. – 192 с.

#### Bibliography:

1. Skrebtsov A.M. The optimum heating temperature of the liquid metal in melting units. Two temperature iron-based alloys / A.M. Skrebtsov // casting process. – 2011. – № 1. – P. 3-9. (Rus.)
2. Liquidus temperature of the metal melt and its effect on the amount of oxide inclusions / A.M. Skrebtsov etc. // Actual problems of modern metallurgy. Collection of scientific works dedicated to 100-anniversary of Professor M. Medzhibozhskogo. – Mariupol: PSTU. – 2012. P. 79-83. (Rus.)
3. Effect of temperature and holding time of the melt in her quality of solidified casting / A.M. Skrebtsov // News PDTU. – № 22. – 2011. – P. 140-144. (Rus.)
4. Wasilewski P.F. Technology Stolny casting / P.F. Vasilevsky. – М.: Mashinostroenie, 1974. – 408 p. (Rus.)
5. Kolosov M.I. Quality of killed steel ingot / M.I. Kolosov etc. – М.: Metallurgy, 1973. – 408 p. (Rus.)
6. Karnaukhov M.M. Metals steel / MM Karnaukhov: Bessemer and Thomas processes, - L. - М.: DSTI NKTP, 1934 - 246 p. (Rus.)
7. Leikin V.E. Electrometallurgy steel and ferroalloys / V.E. Leikin, P.A. Sakharuk. – М., Metallurgy, 1960. – 600 p. (Rus.)
8. Elanskii G.N. Steel casting and crystallization / G.N. Elanskii. – М.: MGVI, 2010. – 192 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 25.03.2013

УДК: 621.745.55

© Троцан А.И.<sup>1</sup>, Каверинский В.В.<sup>2</sup>, Бродецкий И.Л.<sup>3</sup>, Воронич В.А.<sup>4</sup>

#### МОДИФИЦИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ДИСПЕРСНЫМ ПОРОШКОМ $Al_2O_3$

*В условиях лабораторного эксперимента проведено исследование модифицирования отливок из алюминиевого сплава порошком  $Al_2O_3$ . Показано существенное измельчение структуры и возрастание механических свойств в модифицированном металле. Установлена зависимость характеристик структуры и свойств от расхода модификатора.*

**Ключевые слова:** модифицирование, алюминий, отливка, структура, механические свойства, оксид алюминия.

**Троцан А.И., Каверинський В.В., Бродецький І.Л., Воронич В.А. Модифікування алюмінієвого сплаву дисперсним порошком  $Al_2O_3$ .** В умовах лабораторного експерименту проведено дослідження модифікування виливків з алюмінієвого сплаву порошком  $Al_2O_3$ . Показано суттєве здрібнення структури і зростання механічних властивостей у модифікованому металі. Встановлена залежність характеристик структури і властивостей від розходу модифікатора.

**Ключові слова:** модифікування, алюміній, виливка, структура, механічні властивості, оксид алюмінію.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> вед. инженер, аспирант, Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев

<sup>3</sup> канд. техн. наук, с. н. с., Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев

<sup>4</sup> магистрант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь